

宁夏六盘山香水河小流域华北落叶松人工林乔木层生物量的坡面变化和尺度效应

王云霓¹, 邓秀秀², 王彦辉^{1*}, 曹恭祥¹, 于澎涛¹, 熊伟¹, 徐丽宏¹

(1. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 国家林业局森林生态环境重点实验室, 北京 100091;

2. 中南林业科技大学, 长沙 410004)

摘要:生物量受坡面环境条件变化影响而有坡面变化与尺度效应。本文在六盘山半湿润区的香水河小流域选择了33 a生华北落叶松人工林的一个斜坡长480 m, 水平长398 m的典型坡面, 在整个坡面上建立了宽30 m的调查样带, 均匀分为空间连续的16个样地, 在2014年生长季中期调查不同坡位的样地生物量, 分析其坡面变化规律。结果表明:生物量存在明显的坡位差异。坡面生物量 $t \cdot \text{hm}^{-2}$ 平均值为118.59, 其变化范围为96.19~139.18, 变幅为42.99, 变异系数为0.12; 随着离坡顶距离的增加, 生物量总体上呈现先升高后降低的变化趋势, 在坡面的中上部(水平坡长为87.71 m)达到最大。生物量存在坡面空间尺度效应, 即随着相对坡长(X_1)的增加, 生物量的顺坡滑动平均值(Y_1)先增大后减小, 其回归关系式为: $Y_1 = 23.004 X_1^3 - 60.834 X_1^2 + 31.786 X_1 + 123.43 (R^2 = 0.84)$, 坡面尺度效应表现为每100 m水平坡长生物量变化的数值为 $6.12 t \cdot \text{hm}^{-2}$; 各样地生物量与整个坡面平均值的比值(Y_2 , 小数)随相对坡长有很好的非线性关系, 基本上呈先增加后下降、后趋于稳定的变化趋势, 其关系式为 $Y_2 = 1.722 6X_1^3 - 2.844 5X_1^2 + 1.033 8X_1 + 1.000 1 (R^2 = 0.57)$, 可基于此将特定坡位样地的生物量换算成整个坡面的估算值。造成生物量坡面变化的主要原因是太阳辐射和光照时间随海拔的变化等多种因素造成的。

关键词:尺度效应; 坡位差异; 生物量

中图分类号: S791.22

文献标识码: A

The Variation of Biomass of *Larix principis-rupprechtii* Plantation along Slopes and It's Scale Effect in the Xiangshuihe Watershed of Liupan Mountains of China, Ningxia

WANG Yun-ni¹, DENG Xiu-xiu², WANG Yan-hui¹, CAO Gong-xiang¹, YU Peng-tao¹, XIONG Wei¹, XU Li-hong¹

(1. Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry,

Key Laboratory of Forestry Ecology and Environment of State Forestry Administration, Beijing 100091, China;

2. Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: In this study, one representative slopes covered by the 33-year-old *Larix principis-rupprechtii* plantation were selected in the small watershed of Xiangshuihe within the semi-humid region of Liupan Mountains, northwest China. Sixteen stand plots were set up continuous along the slope positions of slope top. The biomass was measured in the middle of growing season in 2014. The results showed that the mean biomass on the slope was $118.59 t/\text{hm}^2$, with a range of $96.19 \sim 139.18 t/\text{hm}^2$, and the variation range of $42.99 t/\text{hm}^2$ and the coefficient of variation was 0.12. The variation pattern of biomass along slope positions was shown a trend of first increase then decrease,

收稿日期: 2014-10-10

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41230852)、国家自然科学基金重大项目(41390461)、科技部“十二五”农村领域国家科技计划(2012BAD22B030102)、国家林业局宁夏六盘山森林生态定位站联合资助。

作者简介: 王云霓, 女, 博士, 主要从事植物生理生态、森林生态水文等研究, E-mail: yunni5186@12.com

* 通讯作者: E-mail: wangyh@caf.ac.cn

reached the maximum at the middle-upper slope (horizontal slope length is 87.71 m). The biomass existed the slope scale effect. It was found that the moving averaged biomass (Y_1) increases gradually with the increasing relative horizontal length (X_1) of slope section from slope top. The relationship to express this scale effect on the shady slope is $Y_1 = 23.004X_1^3 - 60.834X_1^2 + 31.786X_1 + 123.43$ ($R^2 = 0.84$). The slope average of biomass increased 6.12 t/hm² per 100 m increase in the slope length on the slope. The ratio of plot biomass to the slope average (Y_2) varies nonlinearly along the relative horizontal distance of plots from slope top (X_1), with the relation expressed as $Y_2 = 1.7226X_1^3 - 2.8445X_1^2 + 1.0338X_1 + 1.0001$ ($R^2 = 0.57$). This relation can be used to calculate the slope mean biomass from the biomass measured at certain slope position. The slope variation of biomass mentioned above is mainly caused by the comprehensive effect of solar radiation and duration of sunshine with the change of elevation along the slope.

Key word: scale effect; slope variation; biomass

生物量是森林生态系统重要的结构和功能指标^[1-3],也是物质循环的重要组成部分^[4-5];此外,森林生物量反映了森林的生长变化及利用自然资源的能力,其固化形式如木材及相关林木产品是经济和社会发展的需求。而且,由于森林在陆地生态系统碳循环中占有非常重要的地位^[5],加之目前全球气候变化的背景,森林生态系统的固碳作用日益得到学界和社会的广泛关注。准确的估算生物量的时空分布及其影响因素对研究全球碳循环过程^[6]和森林经营管理^[7]具有重要的现实意义和科学价值。

有关生物量的空间尺度转化的研究多是基于遥感技术^[8-9]、生态模型^[10-11]、GIS插值和统计分析^[12]的较大空间尺度。如,刘双娜等^[13]基于空间降尺度技术,以中国第六次国家森林资源清查资料为基础,同时结合1:100万植被分布图及同期的基于MODIS反演的NPP空间分布,定量估算了1 km分辨率下我国森林生物量的空间分布,并认为降尺度方法可以较好的解决生物量估算的区域尺度转化问题;侯兆疆等^[11]利用群落调查和广义相加模型(GAM)相结合方法,分析祁连山北坡典型草原山体尺度和坡面尺度上群落地上生物量格局的响应特征;陶冶和张元明^[14]利用相对生长模型(幂函数)在单株、样方及区域尺度上研究了梭梭地上和地下生物量。而在样地到坡面尺度上,生物量的尺度变化迅速,可能是理解生物量尺度变化机理的关键研究尺度,但研究还比较薄弱。生物量在坡面和林分尺度的相关研究多集中在典型林分生物量的物种差异^[15-17]、发育阶段^[18]和坡向、坡位等立地特征差异的简单比较^[19-20],但还缺乏植被生物量坡面变化及空间尺度效应的研究,而坡面尺度的研究与森林经营管理的关系更加密切,也对在较大尺度上开展植

被恢复、树种选择、结构与功能的评估和尺度扩展的可靠性具有承上启下的作用,因此需要给予更多的研究与关注。

华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii* Mayr.)是宁夏六盘山的主要造林树种,已成为当地重要的森林类型,在山地水源涵养、水土保持、木材生产和风景游憩等方面发挥着重要作用。本文在具有半湿润气候的六盘山香水河小流域的一个华北落叶松同龄人工林的典型坡面上,建立了空间连续的不同坡位的样地,调查乔木层生物量的坡位变化并分析其坡面尺度效应,探讨从样地(点)的测定值经尺度上推而获得坡面特征值的方法,进而为坡面研究中代表样地的选择、森林经营与管理中的抽样调查等提供基础知识。

1 研究区概况

香水河小流域(106°09'~106°30'E,35°15'~35°41'N)位于六盘山南部东侧,海拔2040~2931 m;土壤以山地灰褐土为主;属半湿润气候,水分相对充足,年均气温6.8℃,年均降水量636.8 mm,多集中于7—9月份。小流域内的森林以天然次生林为主,主要天然林树种有辽东栎(*Quercus liaotungensis* Koidz)、白桦(*Betula platyphylla* Suk.)、少脉槲(*Tilia paucicostata* Maxim.);华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii* Mayr.)为主要的人工林树种,占人工林总面积的90%,以及小流域面积的24%。灌丛主要有甘肃山楂(*Crataegus kansuensis* Wils.)、箭竹(*Fargesia nitida* Keng f. ex Yi.)、蒙古荚迷(*Viburnum mongolicum* Rehd.)、刺蔷薇(*Rosa acicularis* Lindl.)等;草本种类主要有铁杆蒿(*Artemisa vestita* Wail.)、蕨(*Pteridium aquilum* (Linn.) Kuhn.)、东方

草莓 (*Fragaria orientalis* Lo Sinol-losinsk.)、苔草 (*Carex gmelinii* Hook. et Arn.)、艾蒿 (*Artemisa argyi* H. Lév. & Vaniot.)、糙苏 (*Phlomis umbrosa* Turcz.) 等;土壤以山地灰褐土为主。

2 研究方法

2.1 典型坡面的选择

华北落叶松是当地的主要人工林树种,其人工林占小流域面积 24% 以上,在分水岭沟子流域更是占到 43% 以上,且 72% 以上分布在半阳坡。因此依据坡面完整、坡度相对均匀、林分起源和经营历史相似的原则,在分水岭沟子流域选择了一个东南坡向的华北落叶松林典型坡面(如图 1),其水平坡长为 398.2 m,平均坡度 33.7°;斜坡全长 480.6 m,海拔范围 2 258.5 ~ 2 524.8 m;整个坡面的坡度较均匀,无大的平台或凹地;坡面土壤为山地灰褐土,厚度均在 1 m 以上。所有华北落叶松林均为 33 a 生的中龄林,足以能反映不同坡位立地的植被生长影响差异。

2.2 样地设置与调查

2014 年生长季中期在坡面上连续设立了 16 个

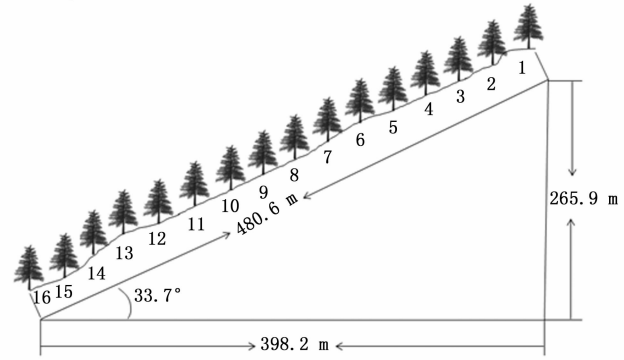


图 1 华北落叶松林典型坡面示意图

30 × 30 m² (坡宽 × 坡长) 的华北落叶松林样地,逐株调查胸径、树高、枝下高、冠幅等生长特征。该坡面上林分郁闭度较为均匀,平均为 0.74 左右。各样地的林下灌木发育不明显,覆盖度在 15% 左右,主要种类为刺翅蛾蛴蔷薇 (*Rosa omeiensis* Rolfe.)、野李子 (*Prunus salicina* Lindl.)、箭竹、甘肃山楂、蒙古莢蒾等。林下草本层发育明显,覆盖度约 40%。样地间的草本种类无明显差异,以东方草莓和苔草为优势种。有关的样地基本信息见表 1。

表 1 华北落叶松人工林样地基本信息

样地	海拔/m	坡度/°	坡位	土壤厚度/cm	林分密度/ (株 · hm ⁻²)	林冠郁 闭度	平均胸 径/cm	平均树高/m	枝下高/m	冠幅直径/m
1	2 524.5	36	坡上	>100	948	0.74	20.21	17.07	2.38	3.91
2	2 506.9	35.5	坡上	>150	914	0.76	19.55	15.48	1.56	5.06
3	2 489.7	31.2	坡上	>150	922	0.72	19.94	16.63	1.41	5.15
4	2 474.1	27.1	中上	>200	936	0.75	21.00	17.12	1.39	5.61
5	2 460.4	26.5	中上	>200	931	0.78	21.3	17.6	2.60	4.91
6	2 447.1	37.1	中上	>200	906	0.71	19.36	16.42	2.12	4.11
7	2 429.0	35.8	坡中	>200	932	0.76	20.60	17.66	2.38	3.56
8	2 411.4	35.0	坡中	>200	868	0.81	20.65	17.90	2.43	6.44
9	2 394.2	35.6	坡中	>200	930	0.74	19.92	17.59	2.60	4.05
10	2 376.7	27.5	中下	>200	704	0.62	21.20	18.57	3.15	5.08
11	2 362.9	28.9	中下	>100	762	0.68	20.52	17.48	2.11	5.88
12	2 348.4	36.8	中下	>200	805	0.71	18.71	15.72	1.84	5.37
13	2 330.4	36.1	坡下	>200	935	0.80	20.45	18.01	2.76	3.81
14	2 312.6	36.6	坡下	>200	941	0.74	18.18	16.80	2.50	3.75
15	2 294.7	37.2	坡下	>200	893	0.72	17.53	14.99	1.80	4.94
16	2 276.6	37.1	坡脚	>200	933	0.75	18.85	16.0	2.53	3.39

2.3 生物量的测定

为计算华北落叶松林乔木层的生物量,按照径级比例选取标准木各 1 ~ 3 株,本文中调查了 20 棵不同胸径(9.9 ~ 22.6 cm)的标准木。伐到标准木,分层分割地上部分,并按照 1 m 区段截取圆盘,分叶、枝、干、皮称鲜质量后取样,85℃ 恒温下烘干至恒质量,计算各器官的干质量和含水率。

依据华北落叶松林相对生长规律,及地上生物量

(W_1)与胸径(D)、树高(H)的实测数据,选用最代表性的生物量相对生长模型($W = aD^b$ 和 $W = a(D^2H)^b$)建立地上生物量和测树因子(D 、 H)的数量关系。本文最终选用地上生物量与胸径的回归关系(公式 1)来计算单株地上生物量(W_1 , kg)。而根生物量(W_2 , kg)用罗云建^[21]的模型计算。然后将样地内所有树木生物量累加得到整个样地的总生物量,然后根据样地面积计算单位面积上的生物量($t \cdot hm^{-2}$)。

$$\ln W_1 = 2.2235 \ln D_i - 1.9634 (R^2 = 0.9235) \quad (1)$$

$$\ln W_2 = 2.0885 \ln D_i - 3.4782 (R^2 = 0.9742) \quad (2)$$

$$W_T = W_1 + W_2 \quad (3)$$

$$W = 10 \cdot \sum_{i=1}^n W_{Ti} / S \quad (4)$$

式中: W_T 是单株样树的总生物量(kg), D 为胸径(cm), S 为样地面积(m^2), n 为样地内树木株数(株), i 为树木编号。

2.4 坡面加权平均值的计算

在计算了坡面上不同坡位处华北落叶松样地的生物量后,引入各样地所代表的水平坡长进行加权平均,得到整个坡面上的生物量平均值(式5)。在本文中,将生物量从坡顶开始随坡位下移(即坡长增大)逐步加权平均而得到的坡面平均值称为生物量的坡面滑动平均值。

$$W = \frac{W_1 \cdot S_1 + W_2 \cdot S_2 + W_3 \cdot S_3 + \dots + W_n \cdot S_n}{\sum_{i=1}^n S_i} \quad (5)$$

式中: W_1, W_2, \dots, W_n 指不同坡位样地的生物量;

W 指生物量的坡面加权均值;

S_1, S_2, \dots, S_n 指不同坡位样地所代表的水平坡长(m)。

2.5 坡面尺度效应定量评价方法

尺度效应是指某特征值随空间或时间尺度的增大而变化的现象。本文仅考察空间尺度效应,具体评价指标是生物量沿坡滑动加权平均值随坡长增加或者减少的变化速率,如每增加100m生物量变化量的绝对值。

3 研究结果

3.1 样地生物量绝对值的坡面变化

坡面上各样地的生物量有明显的坡位差异,变化在 $96.19 \sim 139.18 t \cdot hm^{-2}$ (图2),变幅为42.99,变异系数为0.12。利用各坡位样地的代表坡长加权平均得到整个坡面生物量平均值为 $118.59 t \cdot hm^{-2}$ 。

随着水平坡长的增加,不同坡位的样地生物量总体上呈现先增大-减小、后趋于平稳的变化趋势,见图2。当离坡顶距离为87.71m,即相对位置为0.22(87.7m/398.2m)的坡面中上部达到最高,其值为 $139.63 t \cdot hm^{-2}$;离坡顶距离在101.1~326.3m内,

生物量显著降低,之后平稳在 $103 t \cdot hm^{-2}$ 左右。

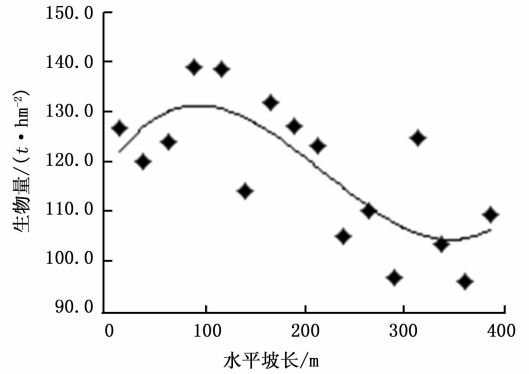


图2 华北落叶松林生物量随离开坡顶距离的变化

3.2 林地生物量相对值的坡面变化

为评价不同坡位样地生物量对整个坡面的代表性及其随坡长的变化规律,建立了不同坡位处生物量与坡面平均值的差值和比值随水平坡长变化的数量关系(图3),藉此可将任意坡位处的样地生物量值转换为坡面平均值。

随着离坡顶距离的增加,不同坡位样地生物量与坡面平均值的差值基本上呈先增大后减小、最后趋于平稳的变化趋势。当离坡顶距离小于225.1m的坡段上,生物量的差值为正值区,但在水平坡长139.9m处,生物量为负值;在离开坡顶225.1~398.2m的坡段上,生物量的差值为负值区,但在302.0~326.3m坡段上,生物量的差值为正的;在坡长0~127.9m,差值呈增大趋势;坡长127.9~350m,差值成降低趋势,之后趋于稳定。各样地LAI与坡面平均值的差值(Y_1 , 小数)随水平坡长(X_1 , m)、相对坡长(X_2)增加呈现为波动性的非线性变化,其回归关系式为: $Y_1 = 3 \times 10^{-6} X_1^3 - 0.0021 X_1^2 + 0.3079 X_1 + 0.0148 (R^2 = 0.57)$; $Y_1 = 204.28 X_2^3 - 337.32 X_2^2 + 122.6 X_2 + 0.0148 (R^2 = 0.57)$ 。

为加深认识生物量变化的坡面效应,又分析了不同坡位样地生物量与坡面平均值的比值随坡长的变化,其变化规律与生物量差值变化相类似。离坡顶距离小于202.81m,生物量比值大于1;之后小于1,在坡下及坡脚样地维持在0.87左右。为从任意坡位处的样地生物量测定值推求坡面平均值,实现从“点”到“面”的尺度转换,统计分析各样地生物量与整个坡面平均值的比值(Y_2 , 小数)与水平坡长(X_1 , m)、相对坡长(X_2)对应的数量关系,得到回归关系式为: $Y_2 = 3 \times 10^{-8} X_1^3 - 2 \times 10^{-5} X_1^2 + 0.0026 X_1 + 1.0001 (R^2 = 0.57)$; $Y_2 = 1.7226 X_1^3 - 2.8445 X_1^2 + 1.0338 X_1 + 1.0001 (R^2 = 0.57)$ 。

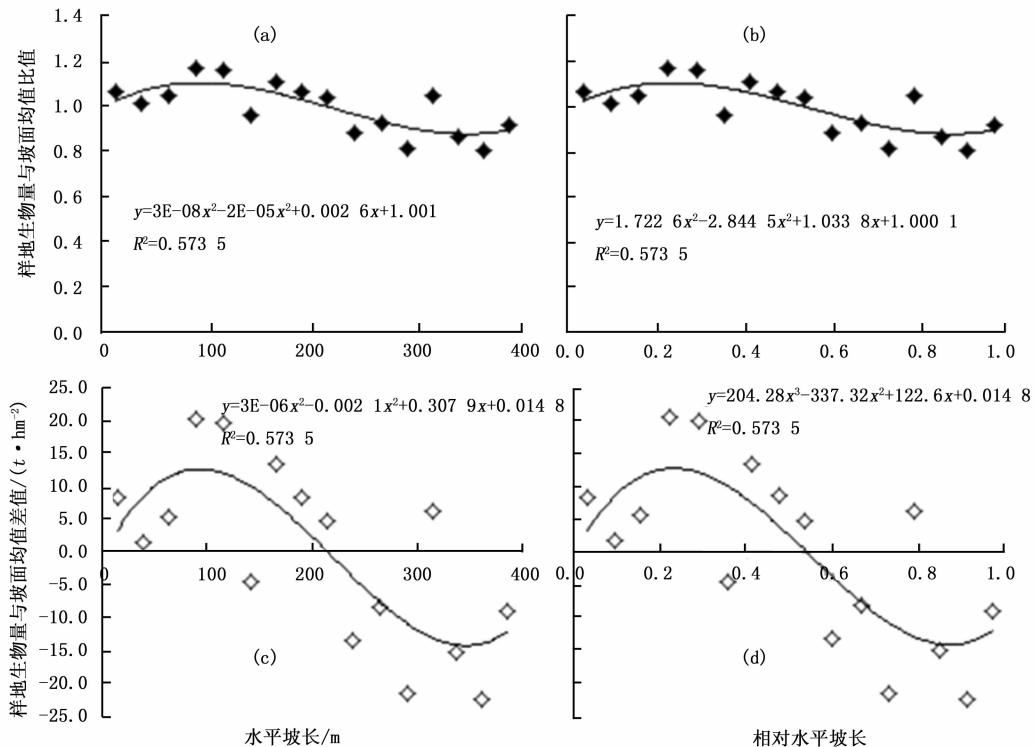


图3 华北落叶松林生物量与坡面平均值的差值和比值随离开坡顶距离的变化

3.3 生物量的坡面空间尺度效应

对于整个坡面,生物量坡面滑动均值变化范围为 118.59 ~ 130.17 t · hm⁻²,变幅为 11.58 t · hm⁻²;平均每 100 m 坡长滑动均值变化 6.12 t · hm⁻²,表明存在明显的坡面尺度效应,但不同坡段的空间尺度效应存在差别,由图 4 知,坡长小于 127.9 m(相对坡长小于 0.32)时,随着坡长的增加,不同坡长生物量呈增加

趋势;在坡长 127.9 m ~ 398.2 m(相对坡长 0.32 - 1)时,生物量呈降低趋势。基于各样地顺坡滑动均生物量和坡长的数据,统计分析了生物量滑动均值(Y)随水平坡长(X₁,m)、相对坡长(X₂)增加的非线性变化的数量关系: $Y=4 \times 10^{-7} X_1^3 - 0.0004 X_1^2 + 0.0798 X_1 + 123.43 (R^2 = 0.84)$ 、 $Y=23.004 X_2^3 - 60.834 X_2^2 + 31.786 X_2 + 123.43 (R^2 = 0.84)$ 。

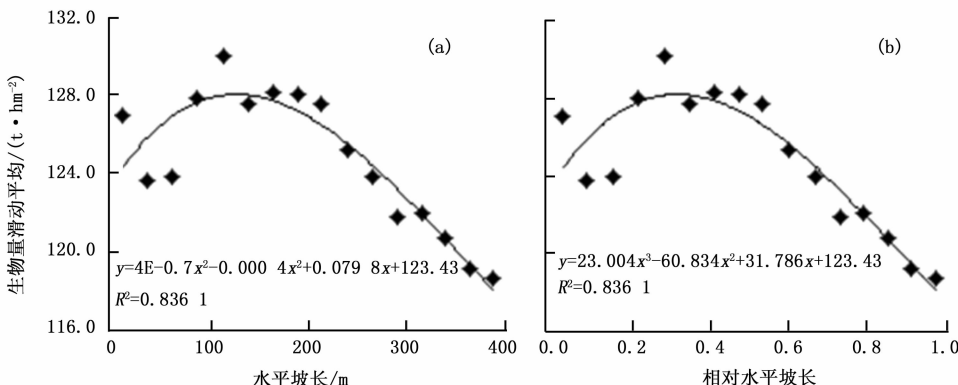


图4 华北落叶松林生物量滑动平均值随离开坡顶水平距离的变化

4 讨论

4.1 生物量坡位变化的原因

生物量主要受植被类型、土壤、气候等因子的影

响^[5,16,19,22],坡位的变化往往伴随着土壤、海拔、气象等微环境的变化。

本研究中土壤厚度均大于 100 cm,而华北落叶松林的根系主要分布在 60 cm 以上,且土壤均为山

地灰褐土,土壤物理性质的坡位差别也不大^[23],故土壤物理性质不是本文中生物量坡位变化的主要原因。此外,坡面的水分再分配会更强烈改变土壤含水量的坡面格局和坡位差异,进而影响到树木生长及其生物量变化。一般来说,径流和土壤水会顺坡流动,使较低坡面处获得更多的降水以外的水分输入,从而表现为土壤含水量从坡顶向下逐步升高^[24-26],但分析坡面水分的再分配对生物量坡位变化的影响需要给出坡面水量平衡中各分项是如何变化的,如果将来能积累更多的调查数据,建立起生物量与土壤水分、林分蒸散及其组分、气象因子等的数量关系或模型,也可以分析某一因子对生物量的影响,找出影响生物量坡面变化的最关键影响因素。

随着海拔升高,大气温度、降水和太阳辐射等环境条件也会发生明显变化^[27],这些变化将影响植物生长季的长短、生理生态特性以及土壤养分的有效性^[28],从而影响树木生长和森林生物量的积累。但有关生物量随海拔变化的研究结论并不一致。如,Carolina等^[29]对亚马逊河流域中部热带雨林的研究发现地上生物量与海拔梯度呈正相关,但对西双版纳橡胶林的研究,却发现地上生物量随海拔上升而下降^[30];本研究结果表明,生物量随海拔的升高先增加后减小,两者的绝对系数为0.51(图5),在研究区,海拔2000和2400m处的年均气温分别为5.4~5.8和3.4~3.6℃;海拔每升高100m,气温降低0.52℃,>10℃积温降低141.7℃,年均降水量增加6.3mm^[31],太阳总辐射增加0.36兆焦耳/平方米,日照时间也增长,故存在随着海拔升高降水增加、太阳辐射增强、日照时间增加等促进树木生长但温度降低不利树木生长的两种相互抵消的作用。但由于本研究区处在半湿润地区,水分可能不是影响生物量坡位变化的主要原因;而高海拔坡位林分接受的太阳辐射更强,日照时间更长,且坡度较大的小山头也更有利于光线在林分中的穿透,使得树木获得更多的阳光^[32],从而积累更多的生物量。因此,太阳辐射和日照时间的坡位差异可能是影响生物量坡面变化格局的关键因素。

4.2 不同坡位样地的坡面代表性

生物量随离开坡顶水平距离增加呈非线性变化来看,不同坡位样地的坡面代表性差别很大,难以基于较小固定面积的单个或多个样地调查做出整体估计,需确定一个基本调查强度或寻找简洁实用的尺度转换方法,并定量分析不同坡段样地的坡面代

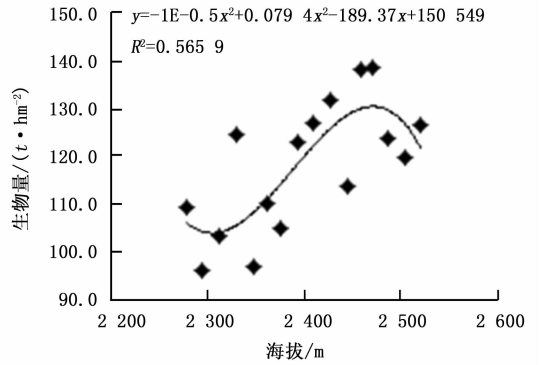


图5 华北落叶松林生物量随海拔的变化

表性。

本文建立的不同坡位样地生物量与坡面滑动均值的比值或差值与离开坡顶水平距离的统计关系,可将任意坡位样地的调查结果经尺度上推得到较可靠的坡面估计值,从而在降低调查强度,这可能是将来实现坡面森林特征精确调查的一个可行途径。如,将1号样地实际观测的生物量(127.09 t·hm⁻²)值代入统计公式,得到坡面生物量的估算值为123.53 t·hm⁻²,与生物量的坡面加权平均值为118.59 t·hm⁻²相差4.94 t·hm⁻²。在森林调查时,可以利用本文中研究成果,在坡面上找到合适的林分,提高调查的精确度,同时减少工作量。但由于影响生物量的因子较多,故不能将本文的一个典型坡面研究结果随意推广,还需要调查更多的坡面、在更多研究区域开展的研究,同时,也需要加深研究造成生物量坡面效应的过程和机理,以便实现尺度转换。

5 结论

在宁夏六盘山半湿润区的香水河小流域,调查了典型坡面上华北落叶松人工林乔木层生物量的坡面变化,结果表明:

(1)生物量存在明显的坡位差异。坡面生物量平均值为118.59 t·hm⁻²,其变化范围为96.19~139.18 t·hm⁻²,变幅为42.99 t·hm⁻²,变异系数为0.12。随着离开坡顶的水平坡长增加,不同坡位样地的生物量总体上呈现先升高后降低的趋势,在坡面的中上部达到最大(离坡顶距离为87.7m)。光照时间和太阳总辐射的坡位差异是造成生物量坡面变化的重要原因。

(2)生物量存在的坡面尺度效应。不同坡位样地的生物量与整个坡面滑动均值的比值和差值均表现为随离开坡顶距离增加的非线性降低,并有很好的

数量关系。其坡面尺度效应表现为每 100 m 水平坡长生物量变化的数值为 $6.12 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。可利用建立的统计关系,从特定坡位样地的生物量换算为整个坡面的生物量。

参考文献:

- [1] Yao T, Yang X, Zhao F, *et al.* Measuring forest structure and biomass in New England forest stands using Echnidna ground-based lidar [J]. *Remote sensing of Environment*, 2011, 115 (11): 2965 - 2974.
- [2] Genet A, Wemsdorfer H, Jonard M, *et al.* Ontogeny partly explains the apparent heterogeneity of published biomass equations for *Fagus sylvatica* in central Europe [J]. *Forest Ecology and Management*, 2011, 261(7): 1188 - 1202.
- [3] Alves L F, Vieira S A, Scaranello M A, *et al.* Forest structure and live aboveground biomass variation along an elevational gradient of tropical Atlantic moist forest (Brazil) [J]. *Forest Ecology and Management*, 2010, 260(5): 679 - 691.
- [4] Namgail T, Rawat G S, Mishra C, *et al.* Biomass and diversity of dry alpine plant communities along altitudinal gradients in the Himalayas [J]. *Journal of plant research*, 2012, 125(1): 93 - 101.
- [5] Hui D F, Wang J, Le X, *et al.* Influences of biotic and abiotic factors on the relationship between tree productivity and biomass in China [J]. *Forest Ecology and Management*, 2012, 264: 72 - 80.
- [6] Nogueira E M, Fearnside P M, Nelson B W, *et al.* Estimates of forest biomass in the Brazilian Amazon: New allometric equations and adjustments to biomass from wood-volume inventories [J]. *Forest Ecology and Management*, 2008, 256(11): 1853 - 1867.
- [7] 陈德祥,李意德,骆土寿,等.海南岛尖峰岭鸡毛松人工林乔木层生物量 and 生产力研究 [J]. *林业科学研究*, 2004, 17(5): 598 - 604.
- [8] Kajisa T, Murakami T, Mizoue N, *et al.* Object-based forest biomass estimation using Landsat ETM+ in Kampong Thom Province, Cambodia [J]. *Journal of Forest Research*, 2009, 14: 203 - 211.
- [9] 王晓莉,常禹,陈宏伟,等.黑龙江省大兴安岭森林生物量空间格局及其影响因素 [J]. *应用生态学报*, 2014, 25(4): 974 - 982.
- [10] Miehe P, Grote R, Battaglia M, *et al.* Evaluation of a process based ecosystem model for long term biomass and stand development of *Eucalyptus globulus* plantations [J]. *European Journal of Forest Research*, 2010, 129: 377 - 391.
- [11] 侯兆疆,赵成章,董小刚,等.祁连山北坡天然草地不同尺度地上生物量空间格局对地形的响应 [J]. *生态学杂志*, 2014, 33(1): 10 - 15.
- [12] 王维芳,宋雨楠,隋摇欣.帽儿山林场生物量估测及时空动态格局分析 [J]. *东北林业大学学报*, 2010, 38(1): 47 - 49.
- [13] 刘双娜,周涛,舒阳,等.基于遥感降尺度估算中国森林生物量的空间分布 [J]. *生态学报*, 2012, 32(8): 2320 - 2330.
- [14] 陶冶,张元明.荒漠灌木生物量多尺度估测——以梭梭为例 [J]. *草业学报*, 2013, 22(6): 1 - 10.
- [15] 郑路,蔡道雄,卢立华,等.南亚热带不同树种人工林生物量及其分配格局 [J]. *林业科学研究*, 2014, 27(4): 454 - 458.
- [16] 张国斌,李秀芹,余新松,等.安徽岭南优势树种(组)生物量特征 [J]. *林业科学*, 2012, 48(5): 136 - 140.
- [17] 刘延惠,王彦辉,于澎涛,等.六盘山主要植被类型的生物量及其分配 [J]. *林业科学研究*, 2011, 24(4): 443 - 452.
- [18] 张田田,马履一,贾忠奎,等.华北落叶松幼中龄林的生物量与碳汇功能 [J]. *东北林业大学*, 2012, 40(12): 32 - 35.
- [19] 张春梅,焦峰,温仲明,等.延河流域自然与人工植被地上生物量差异及其土壤水分效应的比较 [J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2011, 39(4): 132 - 138.
- [20] 明安刚,贾宏炎,陶怡,等.桂西南 28 年生米老排人工林生物量及其分配特征 [J]. *生态学杂志*, 2012, 31(5): 1050 - 1056.
- [21] 罗云建,张小全,王效科,等.华北落叶松人工林生物量及其分配模式 [J]. *北京林业大学学报*, 2009, 31(1): 13 - 18.
- [22] Wen Y G, Chen F, Liu S R, *et al.* Relationship between species diversity and biomass of eucalyptus plantation in Guangxi, south China [J]. *Frontiers of Forestry in China*, 2009, 4(2): 146 - 152.
- [23] 曹恭祥.六盘山香水河小流域植被结构水文影响及其坡面尺度效应 [D]. *中国林业科学研究院博士学位论文*, 2014.
- [24] Qiu Y, Fu B J, Wang J, Chen L D. Spatial variability of soil moisture content and its relation to environmental indices in a semi-arid gully catchment of the Loess Plateau, China [J]. *Journal of Arid Environments*, 2001, 49: 723 - 750.
- [25] 潘成忠,上官周平.黄土半干旱区坡地土壤水分、养分及生产力空间变异 [J]. *应用生态学报*, 2004, 15(11): 2061 - 2066.
- [26] 黄志霖,傅伯杰,陈利顶.黄土丘陵区不同坡度、土地利用类型与降水变化的水土流失分异 [J]. *中国水土保持科学*, 2005, 3(4): 11 - 18.
- [27] Dufour A, Gadallah F, Wagner H H, *et al.* Plant species richness and environmental heterogeneity in a mountain landscape: effects of variability and spatial configuration [J]. *Ecography*, 2006, 29(4): 573 - 584.
- [28] Soethe N, Lehmann J, Engels C. Nutrient availability at different altitudes in a tropical montane forest in Ecuador [J]. *Journal of Tropical Ecology*, 2008, 24(4): 397 - 406.
- [29] Carolina V E, William E M, Nazare A R, *et al.* Variation in aboveground tree live in a central Amazonian forest: effects of soil and topography [J]. *Forest Ecology and Management*. 2006, 234: 85 - 96.
- [30] 贾开心,郑征,张一平.西双版纳橡胶林生物量随海拔梯度的变化 [J]. *生态学杂志*, 2006, 25(9): 1028 - 1032.
- [31] 时忠杰.六盘山香水河小流域森林植被的坡面生态水文影响 [D]. *北京:中国林业科学研究院博士学位论文*, 2006.
- [32] Alves L F, Vieira S A, Scaranello M A, *et al.* Forest structure and live aboveground biomass variation along an elevational gradient of tropical Atlantic moist forest (Brazil). *Forest Ecology and Management*, 2010, 260(5): 679 - 691.